

構造形態創生問題に対する優良解利用の意義
自由曲面シェル構造の形態創生問題に対する数値計算例を通して
Significance of Decent Solution Use for Structural Morphogenesis Problem
Through Numerical Result for Form Generation of Shells with Free Curved Surface

○本間 俊雄¹
 *Toshiho Honma¹

Abstract: In the structural morphogenesis problem, the global optimal solution and the Pareto optimum solution need not necessarily be used. The computation procedure in the structural optimization has been thought from the development of the scheme by the search for the global optimal solution and the Pareto optimum solution. Therefore, searching for the solution based on the objective function space is a conventional computation procedure. However, the purpose of the structural morphogenesis is to obtain the form. In general, a point on the objective function space and a point on the design variable space do not necessarily correspond to the one to one. The solution with comparatively high evaluation including local optimal solution and local Pareto solution are called the decent solution. In this paper, the diversity of the design variable space and the importance of the decent solution search are explained through the form generation problem of shells with free curved surface.

1. はじめに

20 世紀後半より構造形態の創生に対応する研究が認識され始め, 21 世紀に入り基礎や応用に関する様々な議論が交わされるようになった^[1-4]. それに伴い実建築の施工例も見られ^[5,6], 設計者の意向に沿い, 従来では想像され得なかったダイナミックあるいは繊細な種々の建築物が現われている.

構造形態創生問題は, 一般に最適化問題として扱われる. しかし, 必ずしも大域的最適解やパレート最適解(力学的合理性を満足した解)が良い建築形態とは限らない^[7]. 本報告では, 構造形態の創生に対する解の捉え方, 解探索アルゴリズムの考え方, 目的に応じた解の利用法を整理し, 優良解の意味と解析上の留意点を自由曲面シェル構造の形態創生に対する数値計算例を通して説明する.

2. 構造形態創生に対する定式化

一般に構造形態に関係する問題の定式化は, 単一目的最適化を目指す問題の場合, 次式で与えられる.

目的関数: $f(\mathbf{A}, \mathbf{R}) \rightarrow \min \text{ or } \max$ (評価尺度) (1)

制約条件: $g_i(\mathbf{A}, \mathbf{R}) \leq 0$ ($i=1,2,3,\dots,m$) (不等式制約条件) (2)

$h_k(\mathbf{A}, \mathbf{R})=0$ ($k=1,2,3,\dots,l$) (等式制約条件) (3)

$\mathbf{A}^L \leq \mathbf{A} \leq \mathbf{A}^U, \mathbf{R}^L \leq \mathbf{R} \leq \mathbf{R}^U$ (側面制約条件) (4)

設計変数: $\mathbf{A}=[A_1 A_2 A_3 \dots A_p]^T, \mathbf{R}=[R_1 R_2 R_3 \dots R_s]^T$

ただし, \mathbf{A} と \mathbf{R} は共に未知量ベクトルであり, 各々材料定数や部材断面積・厚等の部材特性ベクトルと形状情報を与える節点位置ベクトルである. 多目的最適化を目指す問題の場合には, 式(1)を次式と入れ換える.

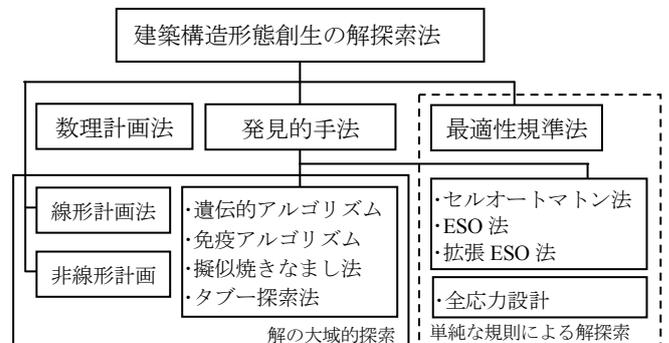


Fig.1 Categorization of solution search algorithm

$f(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = \{f_1(\mathbf{A}, \mathbf{R}), f_2(\mathbf{A}, \mathbf{R}), \dots, f_l(\mathbf{A}, \mathbf{R})\} \rightarrow \min \text{ or } \max$ (5)

以上のように構造形態創生法は構造最適化と同一に扱う. ただし, 問題の内容によって, 単一目的最適化では大域的最適解を, 多目的最適化ではパレート最適解を探索する場合と, 局所最適解や局所パレートフロントを含む, 許容解で比較的評価の高い解(優良解: decent solution)を探索する場合に分けて考える.

3. 解探索法

著者は構造形態創生法における解探索法を次の三つに分類した(Fig.1)^[4].

- a) 数理計画法 (mathematical programming)
- b) 発見的的手法 (heuristic procedure)
- c) 最適性基準法 (optimality criteria method)

問題毎の形態創生技術は上記 a)-c) に分類された計算手順を適用する. c) は全応力設計 (fully stressed design: FSD) に代表され, 単純な操作(規則)の繰り返しによる手順として a) より分離した.

1: 鹿児島大学大学院理工学研究科 建築学専攻, Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University

数理計画法には、線形計画法・非線形計画法・離散的計画法・動的計画法・ネットワーク計画法等がある^[7]。問題に依存しないメタヒューリスティック (meta-heuristic) の代表例は、多点探索の遺伝的アルゴリズム (genetic algorithms : GA) や単点探索の疑似焼き鈍し法 (simulated annealing : SA) がよく知られている^[8]。最近、多点探索の粒子群最適化 (particle swarm optimization : PSO)^[9] に代表される群知能 (swarm intelligence : SI) 解法が注目されている。

4. 最適解と優良解の位置付け

単一目的最適化問題では一つの大域的最適解の獲得を目指す。多点探索の発見的手法では、解の収束に情報エントロピーの同一性を判断基準とするときがある。多目的最適化問題ではパレート最適解の集合を探索する。多点探索の発見的手法では目的関数空間でニッチ (niche : 生態学的地位) 操作を導入し、目的関数空間の多様性を確保する。ただし、構造形態の決定では目的関数空間の多様性だけでなく、形状を決定する設計変数空間の多様性も同時に満たす必要がある。一つの目的関数値に対して一つの形態だけに対応するとは限らない。しかしながら上述したように現状、単一・多目的最適化問題に関わらず、目的関数空間の多様性のみに関心する力点を置いている。両空間の多様性に注目した研究は、遺伝的アルゴリズムに新たなスキーム導入した文献^[10,11]がある。文献^[12-14]は PSO を利用した方法が考えだされている。これらの研究において明確に両空間の多様性を意識したスキームは、多目的最適化問題に対する文献^[14]のみである。しかし、優良解の探索は直接的なアルゴリズムとなっていない。

構造形態創生問題によっては、はじめに述べたように優良解の探索が意味を持つ。設計変数と目的変数両空間の多様性を維持する優良解探索アルゴリズムは、GA系解法を利用した ISGA (GA with immune system)^[15] が提案されている。

5. 自由曲面シェル構造の形態創生問題^[16,17]

Fig.2 に示す一辺が 20m の正方形平面を有する自由曲面シェルモデルを想定する。隅角部はピン支持のシェル構造である。基準形状は平板とする。総ひずみエネルギー・曲げひずみエネルギーの最小化を目標とした単一目的最適化問題を次式で与える。

$$\text{Minimize} \quad f(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = \mathbf{u}^T \mathbf{K} \mathbf{u} / 2 \quad (5)$$

$$\text{subject to} \quad k P_{rs} = h_k \quad (k=1, \dots, \ell) \quad (6)$$

$$\sigma^L \leq \sigma_{\max}(\mathbf{A}, \mathbf{R}) \leq \sigma^U \quad (7)$$

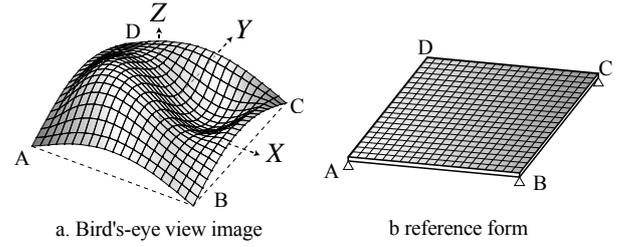


Fig.2 Analysis Model and reference form

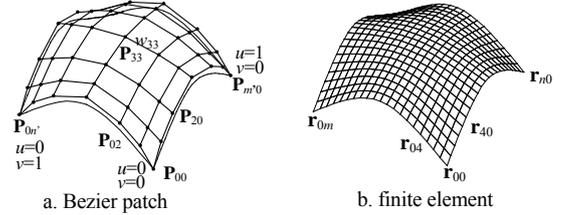


Fig.3 Relation to control points of Bezier surface and finite element

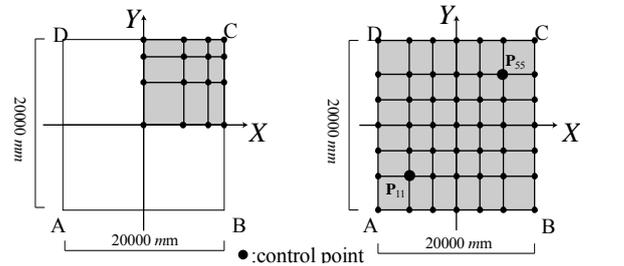


Fig.4 Control points for symmetry and asymmetry model

$$\mathbf{A}^L \leq \mathbf{A} \leq \mathbf{A}^U, \quad \mathbf{R}^L \leq \mathbf{R} \leq \mathbf{R}^U \quad (8)$$

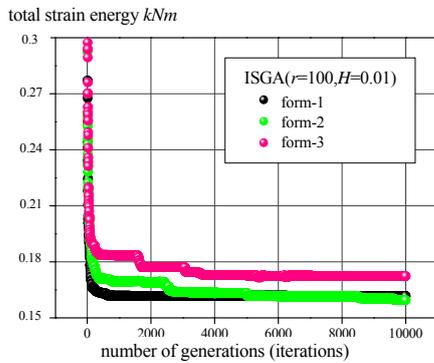
ここで、 $\mathbf{A}=[A_j]$: 要素特性ベクトル、 $\mathbf{R}=[R_j]$: 節点情報ベクトル、 \mathbf{u} : 変位ベクトル、 \mathbf{K} : 剛性マトリクスである。式(6)は k 番目の rs 位置の制御点 $k P_{rs}$ に h_k を規定することを意味する。 σ^L 、 σ^U は許容応力である。度曲面の離散化は 4 節点のアイソパラメトリック要素を採用する。曲面形状 (板厚と節点座標) の表現は、ベジェ曲面の採用によりその制御点を設計変数 (\mathbf{A}, \mathbf{R}) とする。ベジェ曲面は制御点と基底関数により定義され、制御点と有限要素の関係は Fig.3 に示す。これにより計算効率の向上を図る。側面制約条件式(8)に対しては、板厚範囲 $A_j^L=50\text{mm}$ 、 $A_j^U=200\text{mm}$ 、基準位置より $R_j^L=0\text{mm}$ (基準位置)、 $R_j^U=7000\text{mm}$ とする。自重 24kg/m^3 、等分布荷重 1.0kg/m^2 を与える。ISGA の計算パラメータは Table-1 の通りである。 $r=100$ 、 $H=0.01$ のみの試行結果を示す。

6. 対称曲面シェル構造の形態創生 (Model-A)

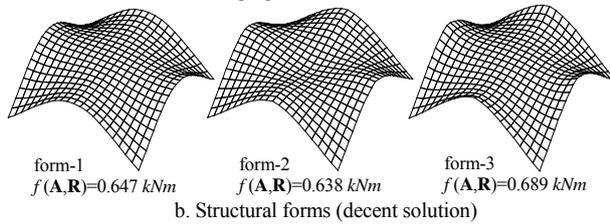
対称曲面シェル構造の場合、計算上、対称性を考慮し Fig.4a ハッチング部 1/4 モデル (節点数 121, 要素数 100: Model-A) を扱う。解析領域とベジェ曲面による制御点位置も対称性の 1/4 モデルを考慮する。まず、総ひずみエネルギー式(5)と式(7),(8)を用いた結果を Fig.5 に示す。a. は 3 例の目的関数値計算過程を示している。各

Table 1 Computing parameter of ISGA for Model-A, -B

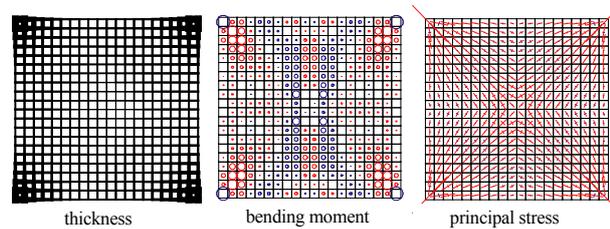
Number of final generations	Model-A:10000 -B: 2000	Mutation ratio	Model-A:0.005 -B:0.001
Population size	200	Number of memory cells	100
Gap rate	0.9	Crossover strategy	tournament
Crossover rate	0.7	Selection method	two point crossover



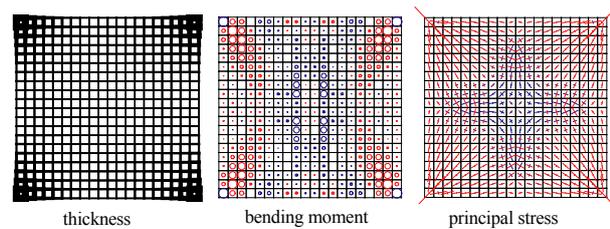
a. Converging situation of solution



b. Structural forms (decent solution)



c. Distribution of shell thickness and mechanical behavior for form-1



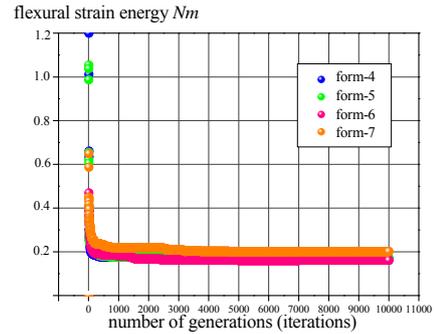
c. Distribution of shell thickness and mechanical behavior for form-2

Fig.5 Numerical results for Model-A(total strain)

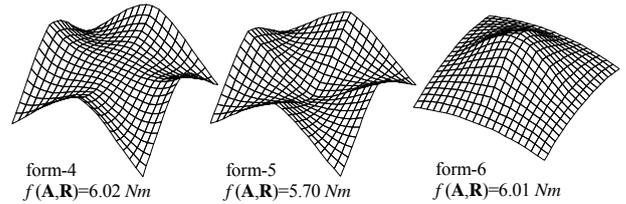
試行で得られた曲面形態は b. に示す. c.,d.は性状が異なる form-4,-6 のシェル厚と応力状態の分布図である. 次に, 曲げひずみエネルギー式(5)と式(7),(8)を用いた結果を Fig.5 と同様に Fig.6 に示す.

7. 非対称曲面シェル構造の形態創生 (Model-B)

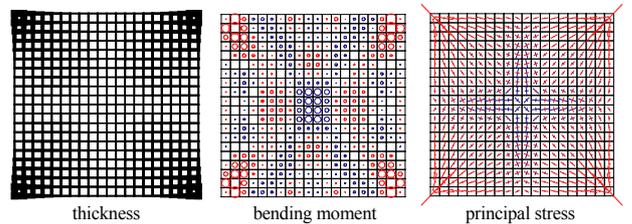
非対称曲面シェル構造の計算上は, Fig.4b フルモデル(節点数 441,要素数 400: Model-B)を扱う. 制御点の制約は, 1点制約: $zP_{11}=15m$, 2点制約: $zP_{11}=15m, zP_{55}=0m$ を与えた. 総ひずみエネルギーを目的関数とした解析結



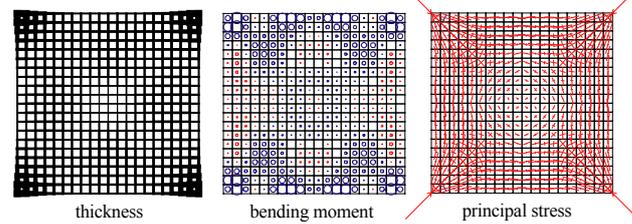
a. Converging situation of solution



b. Structural forms (decent solution)



c. Distribution of shell thickness and mechanical behavior for form-4



c. Distribution of shell thickness and mechanical behavior for form-6

Fig.6 Numerical results for Model-A(flexural strain)

果の形状図を 1点制約, 2点制約それぞれ Fig.7, 8 に示す. Fig.7, 8 より各一つ形態を選び, シェル厚と応力状態の分布図を示す.

8. 自由曲面シェル構造の形態創生に対する考察

数値計算例では, 単一目的最適化による自由曲面シェルの構造形態創生を行った.

対称曲面シェル構造の計算では, Fig.6 form-4 と-6 の結果からほぼ同一の曲げひずみエネルギーを有し, かつ大きく異なる形態を得た. 従来の GA 系解法であれば, どちらかが淘汰される. 非対称曲面構造においては, 制御点の制約条件を付与することにより, 種々の形態(優良解)が得られることを示した. これらのことから, 設計者の意向に沿った制約条件を導入することで, 設計変数空間上で多様な優良解が提示できることを確認した. 制約条件は, 制御点の位置指定により凹凸の向

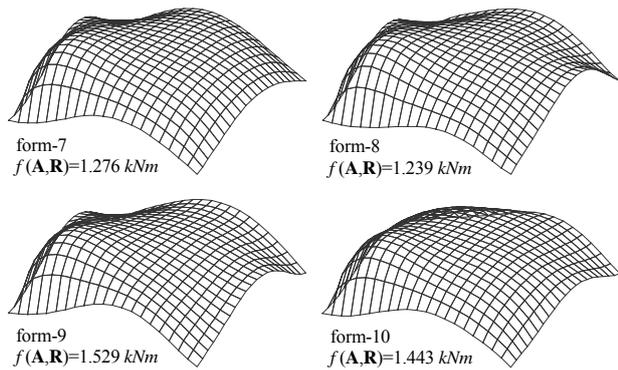


Fig.7 Structural forms for Model-B (constraint for 1 control point)

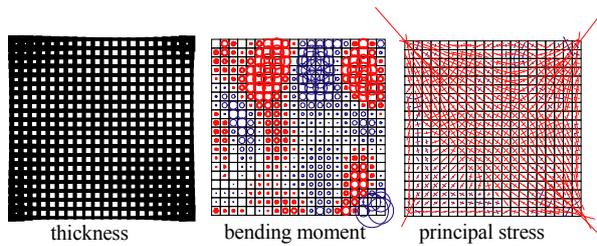


Fig.9 Distribution of shell thickness and mechanical behavior for form-9 (Model-B: constraint for 1 control point)

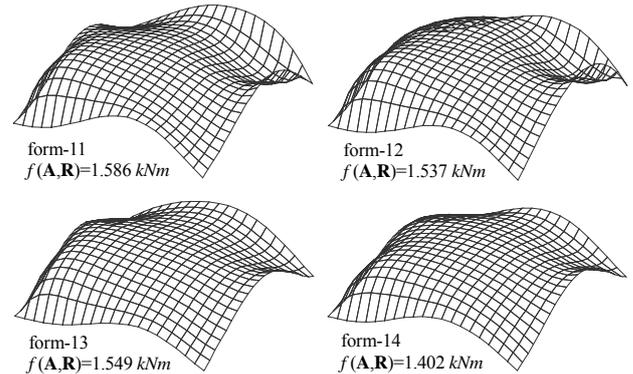


Fig.8 Structural forms for Model-B (constraint for 2 control points)

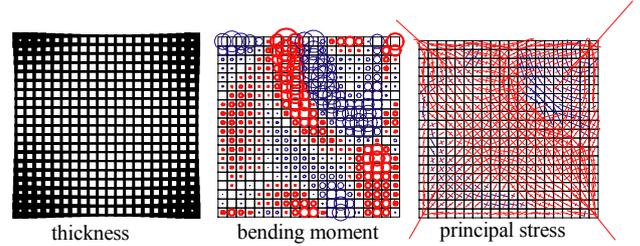


Fig.10 Distribution of shell thickness and mechanical behavior for form-12 (Model-B: constraint for 2 control points)

きや曲率の大きさあるいは開口部が設定できる。内包する体積を制約条件にすれば、用途に対する設定も可能にする。つまり、優良解の利用は、設計者の発想を刺激し得る可能性があると考えている。多目的最適化問題に優良解の概念を広げるとさらに多くの形態を提示できるであろう。

9. おわりに

構造形態の創生問題は、必ずしも大域的最適解あるいはパレート最適解の利用に拘る必要がない。ただし、従来の数値解析手順では目的関数と設計変数の両空間の多様性を考慮した沢山の優良解を探索する発想がなかった。ここでは、単一目的最適化問題に対する自由曲面シェル構造の例を用いて優良解の意義を説明した。多目的最適化問題に対しても同様に考えられる。ただし、得られた優良解に対しては、初期不整等の構造に関するロバスト性(robustness)をチェックする必要がある。

10. 参考文献

[1] 日本建築学会編：構造形態の創生と最適化セミナー資料，2005.01
 [2] 日本建築学会編：コロキウム構造形態の解析と創生資料集，2006.11, 2007.10, 2008.10, 2009.10, 2010.10
 [3] 本間俊雄：構造形態創生と優良解とアルゴリズム・デザイン，アルゴリズム・デザインによる建築形態創生の現状と展望，第30回情報・システム・利用技術シンポジウム論文集，日本建築学会，239-241, 2007.12
 [4] 本間俊雄：構造形態の創生と最適化，第9回「シェル・空間構造」セミナー，設計への計算機の応用と解析上の留意点，25-32, 日本建築学会，2010.07

[5] 本間俊雄：構造形態創生法の技術 -現状と展望-，日本建築学会大会(中国)シェル部門パネルディスカッション コンピュータテクノロジーと建築デザイン資料，1-18, 2008.09
 [6] 岡田章監修：特集 フォームと構造システム，建築技術，91-175, 709, 2009.02
 [7] 加藤直樹：数理計画法，コロナ社，2008
 [8] 三井和男，大崎純，大森博司，田川浩，本間俊雄：発見的最適化手法による構造のフォームとシステム，コロナ社，2004
 [9] J.Kennedy：Particle swarm optimization, Proc. of IEEE the International Conference on Neural Networks, Perth, 1942-1948, 1995
 [10] 金和美，廣安知之，三木光範：目的関数空間と設計変数空間におけるパレート最適解の多様性を維持するアーカイブメカニズム，情報処理学会論文誌，数理モデル化と応用 46(SIG17(TOM13)), 102-113, 2005
 [11] 小林賢二，廣安知之，三木光範：ネットワークインバージョンを利用した多目的遺伝的アルゴリズムのための多様性維持メカニズム，情報処理学会論文誌，数理モデル化と応用，1(1)，27-42, 2008.9
 [12] 北山哲士，荒川雅生，山崎光悦：領域適応型Particle Swarm Optimizationの提案，日本機械学会論文集C編，73(725), 280-287, 2007
 [13] 北山哲士，荒川雅生，山崎光悦：非劣解の多様性を考慮した多目的Particle Swarm Optimization，日本機械学会論文集，C編 74(742), 1575-1583, 2008
 [14] S.Habaguchi, S.Kitayama and K.Yamazaki：Multi- Objective Particle Swarm Optimization using the Pareto- Fitness Function, CJK-OSM6 CD-ROM Proceedings, J-61, 2010.7
 [15] 本間俊雄，野瑞憲太：解の多様性を考慮した遺伝的アルゴリズムによる構造形態の創生，日本建築学会構造系論文集，614, 35-43, 2007
 [16] 和田大典，本間俊雄：解の多様性を考慮したGA系解法によるパラメトリック曲面を利用した自由曲面シェルの構造最適化，日本建築学会研究報告九州支部，第49・1号構造系，221-224, 2010.3
 [17] 本間俊雄，和田大典：多様性を考慮した曲面構造形態の創生，第59回理論応用力学講演会梗概，45-46, 学術会議，2010.6

注

注1 「美は力学的合理性の近傍にある」(坪井善勝)の言葉のように必ずしも力学的合理性=構造形態と直結しない。